

УДК 621.3.011.74.005

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-4(22)-163-169

Владислав Михайленко, Юлія Чуняк, Владислав Бачинський

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ ІЗ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ В ПОСТІЙНУ З ДВАНДЦЯТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ

Актуальність теми дослідження. У зв'язку з широким використанням напівпровідникових комутаторів у електричних колах сучасних перетворювачів параметрів електроенергії значно ускладнюються задачі аналізу електромагнітних процесів. Найбільші ускладнення виникають при необхідності моделювання усталених і перехідних процесів у розгалужених колах змінної структури, у ланках із реактивними елементами якої виникають синусоїдні, постійні та імпульсні напруги.

Постановка проблеми. Математична модель перетворювача може бути побудована з використанням методу багатопараметричних модулюючих функцій у напрямку розробки нових математичних моделей електромагнітних процесів у колах з напівпровідниковими комутаторами та ланками синусоїдних, постійних та імпульсних струмів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікаціях М. Макаренка, В. Сенька, М. Юрченка, А.А. Щерби та інших вчених було розроблено метод багатопараметричних функцій, який спрощує оцінку електромагнітних процесів у електричних колах синусоїдного струму з напівпровідниковими комутаторами.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Виникла необхідність розвитку багатопараметричних методу для аналізу перехідних процесів у електричних колах з ланками не тільки синусоїдного, але й постійного та імпульсного струмів, необхідних для реалізації електромеханічних і розрядно-імпульсних технологій.

Постановка завдання. Створення математичної моделі для аналізу електромагнітних процесів у напівпровідниковому перетворювачі з багатозонним регулюванням вихідної напруги при підключенні фазних напруг мережі живлення.

Виклад основного матеріалу. У статті проведено аналіз електромагнітних процесів в електричних колах із напівпровідниковими комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах із широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги.

Висновки відповідно до статті. Розроблено нову математичну модель для аналізу електромагнітних процесів у електричних колах напівпровідникових перетворювачів модуляційного типу з багатоканальним зонним використанням фазних напруг трифазної мережі живлення без урахування втрат електроенергії у комутаторах.

Ключові слова: електромагнітні процеси; вихідна напруга; струм.

Рис.: 5. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. У зв'язку з широким використанням напівпровідникових комутаторів у електричних колах сучасних перетворювачів параметрів електроенергії значно ускладнюються задачі аналізу електромагнітних процесів. Найбільші ускладнення виникають при необхідності моделювання усталених і перехідних процесів у розгалужених колах змінної структури, у ланках із реактивними елементами якої виникають синусоїдні, постійні та імпульсні напруги [1].

Постановка проблеми. Математична модель перетворювача може бути побудована з використанням методу багатопараметричних модулюючих функцій у напрямку розробки нових математичних моделей електромагнітних процесів у колах із напівпровідниковими комутаторами та ланками синусоїдних, постійних та імпульсних струмів [2; 3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В праці [4; 5] виконано аналіз транзисторних перетворювачів та проведено дослідження енергетичних показників елементів та системи електроприводу в цілому. Одним з найкращих способів вимикання тиристорів у низьковольтовому імпульсному електроприводі є спосіб паралельно-ємнісної комутації силового тиристора перетворювача постійної напруги. При цьому краще обходитися без додаткового джерела енергії, яке використовують в окремих випадках для підзарядки комутуючого конденсатора, так як при автономному джерелі живлення (аккумуляторній батареї) додаткове джерело енергії знижує ефективність роботи імпульсного електроприводу. В [6] проводиться аналіз тиристорних та транзисторних НПП системи електроприводу, однак для розрахунку цих НПП користуються достатньо складними системами рівнянь.

В роботі [5] розглядається метод структурного синтезу на основі графу зміни стану (ГЗС) та метод структурного синтезу напівпровідникових перетворювачів (НПП) на основі головної топологічної матриці (ГТМ). Використання цих методів синтезу дозволяє отримати повний набір схемних рішень різних відомих класів НПП, а у деяких випадках виявити нові схеми. Розроблені методи доведено до практичних методик на багатьох прикладах генерації напівпровідникових схем різного функціонального призначення.

При підготовці статті були розглянуті публікації [7; 8], присвячені проблемам аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Виникла необхідність розвитку багатопараметричних методу для аналізу перехідних процесів у електричних колах з ланками не тільки синусоїдного, але й постійного та імпульсного струмів, необхідних для реалізації електромеханічних і розрядно-імпульсних технологій. При цьому важливо було визначити особливості підключення електричних кіл із напівпровідниковими комутаторами до фазної та лінійної напруг трифазної мережі електроживлення.

Постановка завдання. Створення математичної моделі для аналізу електромагнітних процесів у напівпровідниковому перетворювачі з багатозонним регулюванням вихідної напруги при підключенні фазних напруг мережі живлення.

Виклад основного матеріалу. Тенденції перетворення електричної енергії, а також успіхи у розвитку напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі. У роботах [1-6] показана доцільність використання структур перетворювачів частоти (ПЧ) з однократною модуляцією при побудові систем вторинного електропостачання для комплексів діагностики електромеханічних пристроїв із різноманітним видом вхідної енергії. У даній роботі проводиться аналіз аспекту використання тієї ж структури ПЧ в якості ланки високої частоти, що стосується побудови й аналізу перетворювачів для комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) напруги.

Структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На цій схемі позначені: СМА, СМВ, СМС – силові модулятори (СМ) фазних напруг A , B і C відповідно, ВВ – високо-частотний випрямляч, Н – навантаження. Сукупність СМ, підключених до енергетичної мережі паралельно і з'єднаних по виходу послідовно, являє собою ланку високої частоти перетворювача.

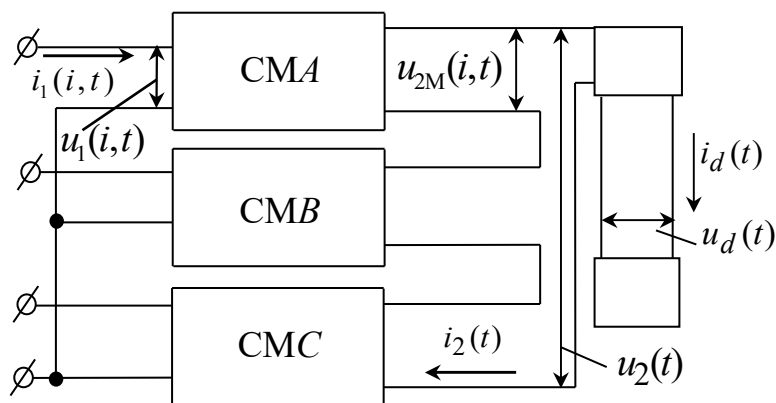


Рис. 1. Структурна схема перетворювача

На структурній схемі СМ показаній на рис. 2 позначені: ІВН – інвертор випрямленої напруги, ТУ – узгоджувальний трансформатор, n – номер ІВН.

Таким чином, кожен СМ має у своєму складі N ІВН, де N – це число інверторів.

Створення математичної моделі перетворювача передбачає розробку математичного забезпечення, спроможного провести аналіз його електромагнітних процесів відносно енергії, яка генерується, з урахуванням характеру навантаження, енергії, яка споживається, а також енергії, яка перетворюється в окремих ланках і в окремими елементами перетворювача.

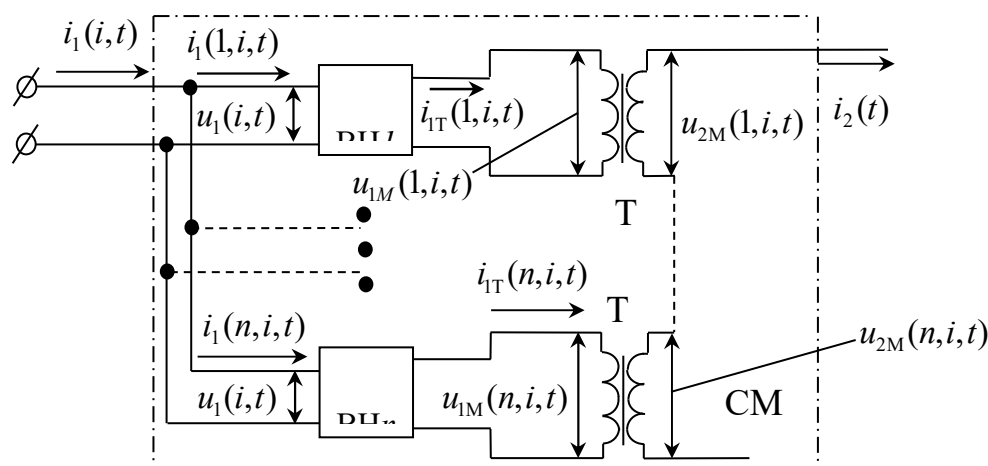


Рис. 2. Структурна схема силового модулятора

При складанні математичної моделі перетворювача використаємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [1], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому приймемо такі припущення: вхідна мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди ІВН представляються ідеальними ключами, трансформатори не мають втрат, а навантаження перетворювача має активно-індуктивний характер.

Така структура дозволяє реалізувати багатоканальний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії мережі, при якому в СМ здійснюється розгалужена модуляція миттєвих значень попередньо випрямлених фазних напруг $u_1(i,t)$, частоти ω_1 , трифазної мережі відповідними модулюючими впливами $\psi(\alpha_p,t)$, частоти ω_2 .

У цьому випадку на виході кожного з ІВН формується промодульована напруга

$$u_{2M}(p,i,t) = k_T \cdot u_1(i,t) \cdot \phi(i,t) \cdot \psi(\alpha_p,t) \quad (1)$$

де $i = 1, 2, 3$ – номери фаз мережі; k_T – коефіцієнт трансформації трансформатора; $p = 1, 2, 3, \dots, n$ – номери зон регулювання; $\phi(i,t)$ – функції прямокутного сіноса, співпадаючі за часом з фазними напругами; $u_1(i,t)$ – миттєві значення вхідної напруги.

Функції прямокутного сіноса подаються як

$$\phi(i,t) = \text{sign} \left\{ \sin \left(\omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right\}, \quad (2)$$

а миттєві значення вхідної напруги мережі представлені у вигляді

$$u_1(i,t) = U_{1m} \sin \left(\omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right), \quad (3)$$

де U_{1m} – амплітудне значення фазної напруги.

Еквівалентні модулюючі впливи подаються виразом

$$\psi(\alpha_p,t) = \frac{1}{2} \sum_2 \text{sign} \left[\sin(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \phi) \right], \quad (4)$$

де $\alpha_p(t)$ – кути управління, за рахунок зміни яких забезпечується ШПР вихідної напруги перетворювача; ϕ – початкова фаза еквівалентних модулюючих впливів.

У перетворювачі забезпечується почергова зміна кутів керування в діапазоні від 0^0 до 90^0 . У формуванні напруги кожної зони керування задіяні три інвертора, які підключені до відповідних фаз мережі живлення. Умови зміни кутів керування у окремих

зонах подаються у наступному вигляді: $\alpha_p(t)=0$, якщо $t < \frac{(p-1)T}{N=12}$; $\alpha_p(t)=\pi$, якщо $t > \frac{pT}{12}$,

а інакше $\alpha_p(t)=f_x(p, N, t)$, де $f_x(p, N=12, t)$ – функція, що задає закон зміни $\alpha_p(t)$, яка залежить від номера зони p і їх кількості $N=12$.

Вихідна перетворювача $u_d(t)$ визначається виразом

$$u_d(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{p=1}^{12} \sum_{i=1}^3 u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(\alpha_p, t) \nu(t), \quad (5)$$

де $\nu(t)$ – функція прямокутного синуса, співпадаюча за часом з положенням вихідної напруги $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача.

$$\nu(t) = \text{sign}(u_2(t)). \quad (6)$$

Для аналізу вихідної напруги перетворювача в (5) позначимо $u_1(i, t) \phi(\alpha_p, t) = |u_1(i, t)|$ і, враховуючи (3) і (4), а також те, що в (6) $\psi(\alpha_p, t) \nu(t) = |\psi(\alpha_p, t)|$, маємо

$$u_d(t) = \frac{1}{2k_T} \sum_{p=1}^{12} \left(\sum_{i=1}^3 \left(\left| U_{1m} \sin \left(\omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right| \cdot \left| \sum_2 \text{sign} [\sin(\omega_2 t \pm (\alpha_p/2) - \varphi)] \right| \right) \right). \quad (7)$$

З приведенного рівняння (7) видно, що вихідна напруга перетворювача досягне максимального значення при умові, що $\alpha_p(t) = 0$. В цьому випадку частота пульсацій вихідної напруги $\omega_{\Pi} = 6\omega_1$, а вираз для $u_d(t)$ прийме вигляд

$$u_d(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{p=1}^{12} \sum_{i=1}^3 \left| U_{1m} \sin \left(\omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right|. \quad (8)$$

Струм навантаження знайдемо, як реакцію RL -ланцюга на дію напруги $\nu(t)$ (6). Для цього диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру, представимо як

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \quad (9)$$

де: y_0 – визначається з початкових умов; R і L – відповідно активний опір і індуктивність навантаження.

Рішення рівняння (9) відносно струму навантаження визначимо числовим методом як

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(y, 0, k, s, D), \quad (10)$$

де: y – вектор початкових умов; $0, k$ – часовий інтервал рішень; s – кількість точок на часовому інтервалі рішень; D – вектор функція диференціальних рівнянь.

Еквівалентні функції (4) і (6), які мають одиничну амплітуду, можна розглядати як функції, що визначають залежність вхідного струму від вихідного струму, який показаний у вигляді рішення рівняння (9) співвідношенням (10). Для визначення струму $i_2(t)$ високочастотного випрямляча необхідно (10) розділити на (6). Якщо в функції перетворення є нульовий рівень операцію ділення на повному періоді існування (8) виконати неможливо. Це призводить до необхідності знаходження струму перед високочастотним випрямлячем на інтервалах ненульового значення, з послідовним припасовуванням результатів окремих підрахунків. Однак подання (6) функцією одиничної амплітуди дозволяє визначити струм $i_2(t)$ перемноженням (10) на (6) і, тим самим, спростити процес підрахунків, представляючи результати на повному інтервалі існування (7) і (10). Таким чином, вхідний струм високочастотного випрямляча має вигляд:

$$i_2(t) = i_d(t) \nu(t). \quad (11)$$

Для визначення вхідних струмів інверторів i -х фаз для кожної p -ї зони регулювання врахуємо, що $i_2(t)$ протікає в загальному контурі всіх СМ, утвореному послідовно з'єднаними вторинними обмотками узгоджувальних трансформаторів і прийнемо до уваги алгоритмічне рівняння (5) і те, що (2), (4) і (6) є функціями одиничної амплітуди.

При цьому в загальному виді

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_2(t)\psi(\alpha_p, t)\phi(i, t)}{3k_T} \tag{12}$$

Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача для дванадцятизонного регулювання, представлені на рис. 3.

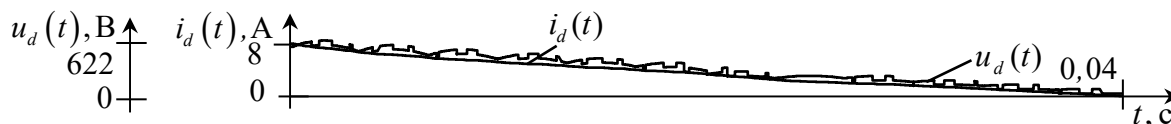


Рис. 3. Часові діаграми струму і напруги навантаження

Для визначення струмів i -х фаз мережі виконаємо сумування вхідних струмів інверторів всіх зон регулювання в кожній з i -ї фази. Враховуючи рівняння (12) загальний вираз для струмів i -х фаз мережі подамо як

$$i_1(i, t) = i_1(1, i, t) + i_1(2, i, t) + i_1(3, i, t) + \dots + i_1(12, i, t), \tag{13}$$

де: $i_1(1, i, t)$, $i_1(2, i, t)$, $i_1(3, i, t)$, $i_1(4, i, t)$, ..., $i_1(12, i, t)$ – вхідні струми інверторів i -х фаз для першої, другої, третьої, четвертої та дванадцятої зон регулювання

Часові діаграми вхідних струмів i -х фаз енергетичної мережі в координатах напруг, побудовані за (13) для дванадцятизонного регулювання, представлені на рис. 4.

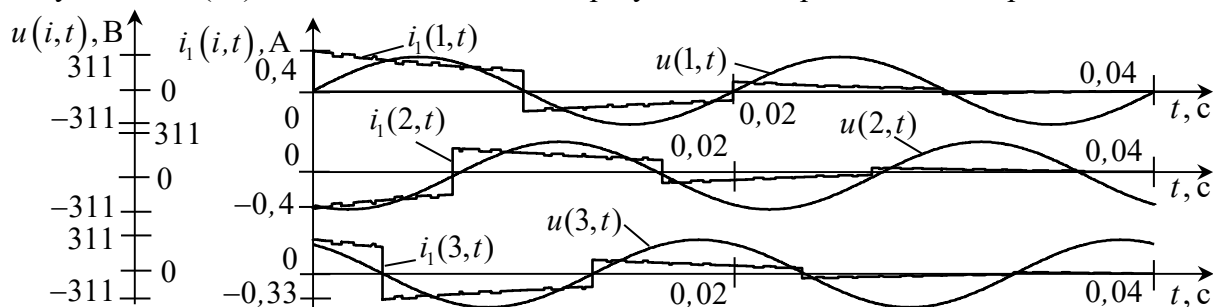


Рис. 4. Часові діаграми вхідних струмів i -х фаз мережі в координатах фазних напруг

Для того, щоб знайти амплітудні значення струмів через силові транзистори ІВН, достатньо проаналізувати струми $i_{1T}(n, i, t)$ первинних обмоток узгоджувальних трансформаторів, котрі знаходяться в колах протікання струмів через силові транзистори.

Висновки відповідно до статті. Підтверджено доцільність використання програмного пакету MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів та оптимізації параметрів напівпровідникових перетворювачів. Такий підхід дозволяє зменшити нестабільність режимів у технологічному навантаженні та режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення.

Розроблено нову математичну модель усталених і перехідних процесів у електричних колах напівпровідникових перетворювачів модуляційного типу з багатоканальним зонним використанням фазних напруг трифазної мережі живлення без урахування втрат електроенергії у комутаторах на першому етапі моделювання для спрощення розрахунків і швидкої оцінки впливу параметрів навантаження на характеристики регульованих вихідних синусоїдних і постійних напруг.

Такий підхід забезпечує швидке визначення алгоритмів управління комутаторами при підключенні напівпровідникових перетворювачів до фазних напруг мережі живлення та підвищення якості знакопостійних напруг при багатозонному регулюванні вихідної напруги. При порівнянні з математичними моделями наведеними у [4-6] похибка розрахунків складала не більше ніж $-5\% \div +3\%$, що дозволяє говорити, що цей метод підходить для швидкої оцінки НПП та режимів його роботи.

Список використаних джерел

1. Макаренко М. П., Сенько В. І., Юрченко М. М. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу. Київ : НАН України, ІЕД. 2005. 241 с.
2. Ivashchenko D. S., Shcherba A. A., Suprunovska N. I. Analyzing Probabilistic Properties of Electrical Characteristics in the Circuits Containing Stochastic Load. *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS-2016*. (June 7–11). Kyiv, 2016. P. 45–48. DOI: 10.1109/IEPS.2016.7521887.
3. Shcherba A. A., Suprunovska N. I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15404/techned2016.03.009>.
4. Гуцалюк В. Я., Юрченко О. М., Зубков І. С., Пазенко В. П. Послідовне з'єднання резонансних інверторів напруги високочастотних установок індукційного нагріву. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 70–73. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.070>.
5. Tereshchenko T. O., Yamnenko Y. S., Kuzin D. V., Klepach L. E. Multilevel inverter topology and control signals definition based on orthogonal spectral transformations. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 57–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.070>.
6. Войтех В.О. Перетворювач частоти в системі з асинхронним двигуном водяного насоса у разі живлення від водяного насоса. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 52. С. 45–48.
7. Nguyen P. K., Lee K. H., Kim S. I., Ahn K. A., Chen L. H., Lee S. M., Chen R. K., Jin S., Berkowitz A. E. Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric Performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. P. 415604-1 – 415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>.
8. Nguyen, P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. P. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.
9. Mykhailenko V.V.; Buryan S.O.; Maslova T.B.; Mikhnenko G.E.; J.M Chunya; Tcharniak O.S. Study of Electromagnetic Processes in the Twelve-Pulse Converter with Eight-Zone Regulation of Output Voltage and Electromechanical Load. *Proc. 6th IEEE International Conference on Energy Smart Systems ESS-2019*. Kyiv, Ukraine, April 17–19, 2019. P. 43–46. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764227.

References

1. Makarenko, N. P., Senko, V. I., Yurchenko, N. N. (2005). *System analysis of electromagnetic processes in semiconductor converters of modulation type electricity*. National Academy of Science of Ukraine, Electrodynamics Institute.
2. Ivashchenko, D. S., Shcherba, A. A., Suprunovska, N. I. (2016). Analyzing Probabilistic Properties of Electrical Characteristics in the Circuits Containing Stochastic Load. *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS-2016*. (pp. 45–48). DOI: 10.1109/IEPS.2016.7521887.
3. Shcherba, A. A., Suprunovska, N. I. (2016). Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Tekhnichna Elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 3, pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15404/techned2016.03.009>.
4. Gutsalyuk, V. Y., Yurchenko, O. M., Zubkov, I. S., Pazenko, V. P. (2018). Serial connection of resonant voltage inverters of high-frequency induction heating systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 4, pp. 70–73. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.070>.
5. Tereshchenko, T.O., Yamnenko, Y. S., Kuzin, D. V., Klepach, L. E. (2018). Multilevel inverter topology and control signals definition based on orthogonal spectral transformations. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 4, pp. 57–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.070>.
6. Voitek, V. O. (2019). Frequency converter in a system with an asynchronous motor of a water pump in case of power supply from a water pump. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine*, 52, pp. 45–48.

7. Nguyen, P. K., Lee, K. H., Kim, S. I., Ahn, K. A., Chen, L. H., Lee, S. M., Chen, R. K., Jin, S., Berkowitz, A. E. (2012). Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric Performance. *Nanotechnology*, 23, pp. 415604-1 – 415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>.

8. Nguyen, P. K., Sungho, J., Berkowitz, A. E. (2014). MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.*, 115(17), pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.

9. Mykhailenko, V. V., Buryan, S. O.; Maslova, T. B., Mikhnenko, G. E., Chunya, J. M., Tcharniak, O. S. (2019). Study of Electromagnetic Processes in the Twelve-Pulse Converter with Eight-Zone Regulation of Output Voltage and Electromechanical Load. *Proc. 6th IEEE International Conference on Energy Smart Systems ESS-2019* (April 17–19, pp. 43–46). DOI: 10.1109/ESS.2019.8764227.

UDC 621.3.011.74.005

Vladyslav Mykhailenko, Julia Chunya, Vladyslav Bachynskiy

ANALYSIS OF PROCESSES IN CIRCUIT WITH A THREE-PHASE-TO-DC CONVERTER WITH TWELVE ZONED VOLTAGE REGULATIONS

Urgency of the research. Due to the widespread use of semiconductor switches in the electrical circuits of modern converters of electricity parameters, the tasks of analysis of electromagnetic processes are significantly complicated. The greatest complications arise when it is necessary to model steady-state and transient processes in branched circuits of variable structure, in which links with reactive elements sinusoidal, constant and pulse voltages occur.

Target setting. The mathematical model of the converter can be built using the method of multiparameter modulating functions in the direction of developing new mathematical models of electromagnetic processes in circuits with semiconductor switches and links of sinusoidal, direct and pulsed currents.

Actual scientific researches and issues analysis. In the publications of M. Makarenko, V. Senko, N. Yurchenko, A. Scherba and other scientists have developed a method of multiparameter functions that simplifies the evaluation of electromagnetic processes in sinusoidal current circuits with semiconductor switches.

Uninvestigated parts of general matters defining. There is a need to develop a multiparameter method for the analysis of transients in electrical circuits with links not only sinusoidal, but also direct and pulsed currents required for the implementation of electromechanical and discharge-pulse technologies.

The research objective. Creation of a mathematical model for the analysis of electromagnetic processes in a semiconductor converter with multiband regulation of the output voltage when connecting the phase voltages of the power supply network.

The statement of basic materials. The article analyzes the electromagnetic processes in electrical circuits with semiconductor switches. A mathematical model for the analysis of electromagnetic processes in semiconductor converters with pulse-width regulation of the output voltage is created.

Conclusions. A new mathematical model for the analysis of electromagnetic processes in electric circuits of semiconductor converters of modulation type with multichannel band use of phase voltages of three-phase power supply network without taking into account power losses in switches is developed.

Keywords: electromagnetic processes; output voltage; current.

Fig.: 5. References: 9.

Михайленко Владислав Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Mykhailenko Vladyslav – PhD in Technical science, associate professor of the theoretical electrical engineers department, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: VladislavMihailenko@i.ua

SCOPUS Author ID: 57191822179

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0973-4612>

Чуняк Юлія Михайлівна – асистентка кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Chunya Julia – assistant teacher of the theoretical electrical engineers department, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4506-912X>

Бачинський Владислав Ігоревич – студент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Bachynskiy Vladyslav – student of the automation of energy processes and systems design department, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).